

Asztroszeizmológia űreszközökkel

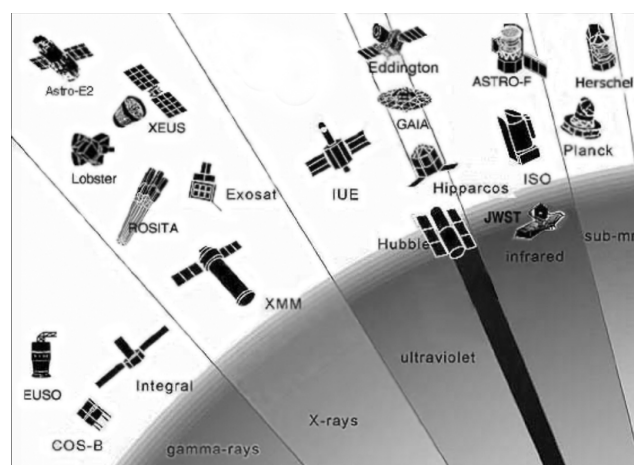
Paparó Margit

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

A csillagászat a legősibb tudományok egyike. Persze a tudomány kifejezésen mindig az adott kor ismereteinek megfelelő állapotát értjük. Az azonban vitathatatlan, hogy attól a pillanattól kezdve, hogy a homo sapiens öntudatra ébredt, a csillagok mindig társai voltak, hol mint félelmetes istenek, hol mint segítőkész iránytűk a háborgó tengeren, hol mint a Földön megismételhető energiaforrások, hol mint a jövő nemzedékek esetleges új Napjai.

A korai és közvetlen kapcsolat annak köszönhető, hogy a Föld légköre áteresztí a csillagok fényét abban a hullámhossztartományban, amit a szemünk érzékelni képes. Természetes folyamat volt, hogy az emberek közelebről akarták vizsgálni a távoli csillagokat, ezért erre alkalmas eszközöket, távcsöveket fejlesztettek ki. Az sem meglepő, hogy az első távcsövek, és még évszázadokon át az újabb változatok is, a szem érzékenységi tartományában, az optikai tartományban működtek. Így kellett lenniük, hiszen a távcsöveken keresztül is az emberi szem felfogóképeségéé, érzékenységéé volt a fő szerep a korai szakaszban. Később a technika fejlődésével először fényképeket készítettek az éppen aktuális fejlettségű fototechnikával (filmek, fotolemezek). A fejlettség nem is olyan régi szintjét a fotoelektron-sokszorozókra alapozott fotoelektromos fotométerek jelentették. Napjaink technikája, a CCD (Charge Coupled Device) ötvözi a fotoelektron-sokszorozó pontosságát a fotografikus technika nagyobb látómezejével, ami lehetővé teszi sok csillag (illetve más, optikai tartományban sugárzó objektum) egyidejű, pontos megfigyelését immár tudományos célokkal.

A következő lépcsőt szintén a technika fejlődése hozta el. A Föld légkörének nyugtalansága, illetve korlátozott áteresztőképessége a teljes elektromágneses tartományhoz képest elvezetett a távcsövek légkör fölé helyezéséhez. Érdekes módon a technika ezen fejlődési szintjén az optikai csillagászat kissé háttérbe szorult. Az élet motorja, az emberi kíváncsiság arra ösztönzött, hogy az eddig nem látható hullámhossztartományokban fejlesszenek ki új érzékelő eszközöket, és először ezeket juttassák fel az űrbe. Ennek köszönhetően az ESA (European Space Agency – Európai Űrügynökség) évekkel korábbi, ma már nem elérhető honlapján tortaszeletekként elhelyezkedő, a különböző hullámhossztartományokban (milliméter alatti, infravörös, ultraibolya, röntgen, gamma-sugár) használható eszközök között csak nagyon szerény szeletet foglal el az optikai tartomány és az optikai űreszközök.

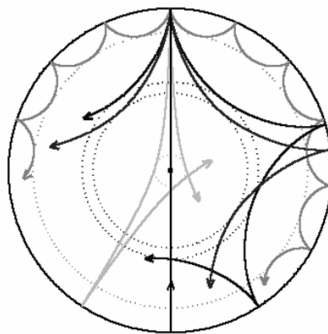


1. ábra. Az ESA asztrofizikai űreszközei a különböző hullámhossztartományokban. Az optikai tartomány csak elenyésző szelet a teljes elektromágneses tartományhoz képest. (<http://sci.esa.int>)

Az optikai tartományban az űreszközök megjelenése szinte az emberi fejlődéstörténetet (a megismerés különböző fokozatait) tükrözi vissza. A Hubble-űrtávcső elsődleges feladata a rácsodálkozás az Univerzum minél távolabbi objektumaira, vagy a közelebbiek minél részletesebb szerkezetének megismerése. A Hipparcos-űrtávcső az iránytű szerepének pontosított változatát, az Univerzumban elfoglalt helyünk pontos meghatározását vállalta fel. A következő lépcső, amíg az ember eljutott addig, hogy miért világítanak a csillagok, évszázadokig tartott. Nem azért, mert csökkent az érdeklődés, hanem azért, mert időbe tellett, amíg az egymást követő generációk felhalmozták a tudást. Azt a tudást, amelyhez elengedhetetlenül szükséges volt több generáció élettartama, hogy a csillagok is változnak, fejlődnek és ezt alapvetően a belsejükben lejátszódó folyamatok határozzák meg. A csillagok belseje az a tartomány, amelynek megismeréséhez már nem új eszköz, hanem kitartó, folyamatos, megfigyelés és az emberi elvonatkoztató képesség kellett.

Évszázadok óta ismert, hogy bizonyos csillagok fénye nem állandó, sőt a megfigyelések pontosságának javulása miatt egyre több csillagról derült ki, hogy kismértékben, de változtatják a fényességüket. Ez a fényváltozás nem vezethető vissza geometriai okokra (fedések) vagy kataklizmikus folyamatokra (nóva, szupernóva-robbanások). Ezek a csillag fényének szelíd, békés, ismétlődő ingadozásai az átlagos érték körül. Az emberi elvonatkoztató képesség akkor jelentkezett, amikor ezt az ismétlődő, békés fényváltozást a csillag egyensúlyi állapota körüli rezgések eredményeként azonosította Arthur Stanley Eddington (1926). A csillag belsejében van egy réteg, az ionizációs zóna, amely a kifelé terjedő energiát periodikusan „elnyeli” (ionizáció), majd újból „kibocsátja” (rekombináció). Létrejön a csillagok pulzációja.

Az elmúlt 50 év során a Napunk kétdimenziós fényváltozásának elképesztően pontos megfigyelései vezettek arra a felismerésre, hogy a fényváltozást a rengések milliói hozzák létre, melyek jellemzői külön-külön meghatározhatók a parányi fényváltozásból. Mivel a különböző rengések a csillagok különböző mélységű rétegéig hatolnak, a rengések frekvenciái közötti különbségek a két réteg közötti tartományra adják meg a fizikai állapotra jellemző mennyiségeket (nyomás, sűrűség, hőmérséklet, He-tartalom, hangsebesség). A csillagok többségében a rengések még a Napnál megfigyelteknél is mélyebb rétegekig jutnak el. Ha kellően sok rengés gerjesztődik egy csillagban, és kellően sokat meg is tudunk figyelni (amplitúdójuk a megfigyelési pontosság fölött van), akkor a csillagokat sugárirányban nagy pontossággal letapogathatjuk.



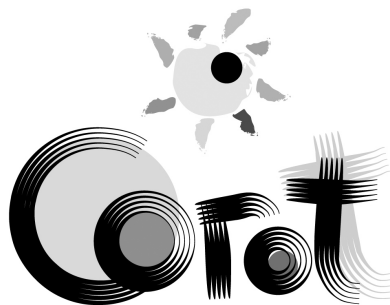
2. ábra. A különböző rengések a csillag különböző mélységéig terjednek. Két közeli frekvencia közel azonos mélységig terjed. A frekvenciák mért különbsége a két fordulópont közötti réteg fizikai paramétereit adja. A Nap rengései csak a külső rétegben terjednek. Más csillagokban a mélyebb rétegeket is vizsgálni lehet.

Így született meg a Nap belső szerkezetének vizsgálatára a *helioszeizmológia*. A Napunk azonban csak egyetlen, egy jól körülhatárolt fejlődési állapotban lévő csillag. Mivel az emberi lét sokkal rövidebb időskálájú, mint a csillagok fejlődése, nem tűnik jó megoldásnak, hogy megvárjuk, amíg a Napunk megöregszik, és közelről nézzük meg egy-egy állapotban milyen a belső szerkezete. Nem várhatunk, hiszen azzal a lehetőséggel is számolnunk kell, hogy a Napunk fejlődése során (a vörös óriás fázisban) drasztikusan befolyásolhatja a földi életet. Rendelkezésünkre áll azonban számtalan csillag, amelyek éppen most vannak olyan fejlettségi állapotban, mint a mi Napunk volt

korábban, vagy amilyenben később megismerhetnénk. A csillagok belső szerkezetének vizsgálatával foglalkozik az *asztroszeizmológia*.

Ez vezetett el ahhoz a lépéshez, hogy az optikai tartományban olyan űreszközben gondolkodjanak, amelyik hosszan, folyamatosan, a földi megfigyeléseknél sokkal pontosabban képes megmérni a megfelelően választott csillagok tucatjainak fényességét. Az ESA az Eddington-űrtávcsövet tervezte erre a feladatra, tisztelegve a névvel Eddingtonnak, aki kidolgozta a csillagok pulzációjának elméletét. Csakhogy a korlátozott gazdasági erőforrások és az emberek olthatatlan kíváncsisága az új dolgok iránt ismét háttérbe szorította az optikai űrtávcsövet az infravörös űrtávcsővel szemben. Az Eddington-űrtávcső megépítését évekkel ezelőtt törölték az ESA programjából. Az ESA újabb terveiben jelent meg az Eddington-űrtávcső helyett a PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars), amely még nem szerepel a régi honlap ábráján. Az Univerzumban elfoglalt helyünk, illetve az Univerzum szerkezeti felépítése olyannyira foglalkoztatja a kíváncsiságunkat, hogy a Hipparcos-űrtávcsőnél is pontosabb mérésekre képes Gaia terve már a régi honlapon is szerepel.

Szerencsére, nem kell még éveket várnunk arra, amíg a PLATO-űrtávcső (remélhetőleg, mivel még nem véglegesített program) lehetőséget ad az asztroszeizmológiára. A Francia Űrügynökség (CNES) zömmel nemzeti programja keretében (noha Spanyolország, Németország, Belgium, Ausztria, Brazília és az ESA is hozzájárult) megalkotta a csillagok szeizmológiai és a Földön kívüli bolygórendszerek bolygóinak mérésére alkalmas eszközt, a CoRoT-űrtávcsövet. Azt az ambiciózus feladatot tűzték ki, hogy a Nap szeizmológiájához hasonló, az asztroszeizmológiához szükséges méréseket végezzenek, összekötve az emberi kíváncsiság azon új területével, hogy egyedül vagyunk-e az Univerzumban. Van-e olyan bolygórendszer, ahol a Földhöz hasonló hőmérséklet- és nyomásviszonyok uralkodnak? Lehetne-e a következő nemzedékeknek más bolygón élni (természetesen, ha a távolságokat le tudjuk győzni)? Az összekötés nem erőltetett, hiszen mindkét esetben hasonló típusú és pontosságú mérésekre van szükség.



3. ábra. A CoRoT-űrtávcső emblémája

A CoRoT-űrtávcső

A CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transit – konvekció, forgás és bolygóátvonulás) űrtávcsövet 2006. december 27-én bocsátották Föld körüli pályára. Elsődleges feladata, mint azt a neve is mutatja, a csillagok konvekciós rétegének és a forgás szerepének jobb megismerése a csillagokban, illetve a Naprendszeren kívüli bolygók felfedezése. Az űrtávcső poláris pályán, közel 896 km magasan kering a Föld körül. A pálya periódusa 6171 másodperc (1 óra 43 perc). Az űrtávcső úgy helyezkedik el, hogy a Nap fénye ne zavarja a megfigyelést, lehetőleg hátulról vagy a legrosszabb esetben oldalról világítsa meg. A technikai megoldást az jelenti, hogy félévenként 180°-kal átforgatják az űrtávcsövet. Így évente két különböző területen, a téli (rektaszcenzió = $6^h 50^m$) és nyári ($18^h 50^m$) területeken lehet megfigyelni a csillagok fényváltozását és a Naprendszeren kívüli bolygók után kutatni. A leghosszabb időtartam, amíg a távcsövet egy adott területre irányítják, 150 nap. Vannak rövidebb, 20-30 napos időtartamú megfigyelések is, a távcső átfordítása előtt és után. Az űrtávcső teljes működési idejét két és fél évre tervezik. A korábbi űreszközök hosszabb élettartama azt jósolja, hogy a CoRoT is tovább üzemel majd, mint a névleges időtartam.

Az űrtávcső teljes látómezeje $3,05^\circ \times 2,70^\circ$, amely két egyenlő részre oszlik a két tudományos feladat között, az adott feladatnak megfelelő speciális körülményekkel.

Az asztroszeizmológiai célok a csillagok fényének nagyon gyakori mérését igénylik. Itt 32 másodpercenként történik egy mérés. Ilyen rövid időtartam alatt a megfelelő pontosság eléréséhez szükséges számú fotont csak fényesebb csillagokra lehet összegyűjteni. A fényességtartomány a „szeizmo” területen $5,5 < V < 9,5$ magnitúdó. A telemetriai kapacitás azonban határt szab az adatátvitelnek. A szeizmo típusú méréseket egy-egy területen csak 10 kiválasztott csillagra lehet a rendelkezésre álló rövid idő alatt lehozni a Földre.

Az „exo” területen az elsődleges cél, hogy minél több csillag fényét vizsgáljuk, hogy nem okoz-e fényességcsökkenést a csillag korongja előtt elhaladó bolygó. A célnak megfelelően minden csillag fényességét méri, területenként ~12 000 csillagról van szó. Szintén a telemetriai kapacitás határozza meg, hogy a folyamatosan zajló méréseket csak 8 percenként összegezve hozzák le a Földre. Fényes csillagok 8 perces folyamatos mérésénél olyan sok foton gyűlne össze, hogy a CCD telítődne. Az exo területen a fényességtartomány $11,0 < V < 16,5$ magnitúdó. Több száz csillag esetén gyakoribb mintavételezésre (32 másodperc) is lehetőség van, amit bizonyított bolygófedések követésére használnak. Az exo területeken mért rengeteg csillag kiváló lehetőséget ad nemcsak a bolygók felfedezésére, hanem asztroszeizmológiai vizsgálatokra is, különösen a hosszabb pulzációs periódusú pulzáló csillagokra. A CoRoT-űrtávcső asztroszeizmológiai eredményei reményeink szerint ugrásszerű előrelépést jelentenek a csillagok belső szerkezetének megismerésében.

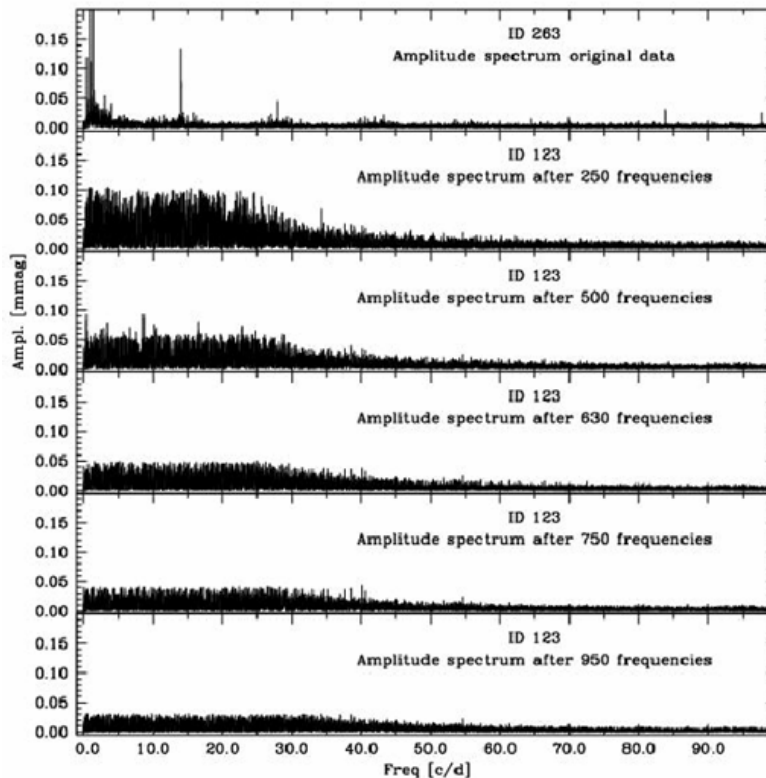
A CoRoT-űrtávcső első asztroszeizmológiai eredményei

A CoRoT-űrtávcső eddigi mérései csillagok ezreinek fényváltozásáról adnak számot. A szeizmo terület egyenként válogatott, speciális asztroszeizmológiai célpontjai mellett az exo területen mért csillagok 40%-a mutat fényváltozást. Sok közülük olyan kis mértékű, amelynek méréséről földi körülmények között nem is álmodhattunk. Sok közülük geometriai eredetű (fedések), sok változást a napfoltokhoz hasonló csillagaktivitás magyaráz, de szép számmal maradnak olyan csillagok, amelyek a különböző fejlődési állapothoz tartozó belső szerkezetről adnak hírt. Az adatok részletekbe menő feldolgozása időbe telik, és addig sem az adatok, sem az eredmények nem publikusak. Az első publikált eredmények már az asztroszeizmológia területén is megszülettek, melyeket az első nemzetközi CoRoT-szimpozíumon mutattak be. Kiváló összefoglalást adtak az első eredményekről *Sódorné Bognár Zsófia és Szabó Róbert Csillagrendések és távoli naprendszerek nyomában* című cikkükben, mely a Természet Világában jelent meg (140. évfolyam, 7. szám, 309. oldal).

A Nap típusú oszcillációk különös jelentősége, hogy a konvekció gerjeszti sztochasztikusan. Kiváló lehetőséget ad a csillagmodellekben a mai napig csak átlagértékkel jellemzett konvekciós zóna pontosabb megismerésére. A konvekció okozta oszcilláció olyan kis mértékű, hogy csak kevéssé emelkedik ki az energiaátvitelt gyorsító konvektív elemek, a granulák véletlenszerű mozgásából. Mivel a granuláció a csillag mágneses teréhez is köthető, több, külön-külön is nehezen vizsgálható fizikai folyamat kapcsolódik ezekben a csillagokban. A Napunk domináns oszcillációja 5 perces karakterisztikájú. A CoRoT-csillagokra talált oszcilláció értékei: HD 49933 – 9,5 perc, HD 181420 – 11,1 perc, HD 181906 – 8,8 perc. Kitöltik az intervallumot a Nap 5 perces oszcillációja és a Procyonra a földi megfigyelésekből kapott 18,5 perces oszcilláció között. Egyértelműen adódnak a csillagok forgási periódusai, esetenként kettős szerkezettel (HD 181906 – 2,9 és 2,6 nap), ami csillagfolt jelenlétére utal a csillag különböző szélességén, és a csillag egyenlítőjével párhuzamos rétegeinek differenciális rotációját jelzi. Minden csillagra meghatározták a gerjesztett módusok közötti reguláris frekvenciakülönbséget (a leghosszabb adatsorokra 75–87,5 mikroHz tartományban). A gerjesztett módusok amplitúdói 3,26–4,02 ppm értékűek, egy nagyságrenddel kisebb hibával.

A CoRoT-űrtávcső egyik fő asztroszeizmológiai feladata a különböző fejlettségi fokú, különböző forgási sebességű Delta Scuti csillagok vizsgálata. Miért is ilyen kiemelt jelentőségűek ezek? A Delta Scuti csillagok a HR diagramon a Naphoz közel helyezkednek el. Azt várhatnánk, hogy felépítésük nagyfokú hasonlóságot mutat a Nappal, így a Napra jól működő modelleknek a Delta

Scuti csillagokra is alkalmasaknak kell lenniük. A napmodell azonban nem működik a Delta Scuti csillagokra. A fő különbséget az okozza, hogy a Delta Scuti csillagoknak a magjuk is konvektív, míg a Napban csak külső konvektív zóna van. Az oszcilláció gerjesztő mechanizmusa is más. A Delta Scuti csillagoknál az ionozációs zóna kappa (opacitási) mechanizmusa játszik szerepet, ellentétben a Nap típusú oszcilláció konvekcióra alapozott sztochasztikus gerjesztésével. A CoRoT-űrtávcső adatai a Delta Scuti csillagok esetén adják a legzavarbaejtőbb eredményeket.



4. ábra. A Delta Scuti csillagok mutatják az eddigi legzavarbaejtőbb eredményt. A Földön megfigyelt néhány gerjesztett rengéshez képest rengés rengés hátán jelentkezik ezekben a csillagokban. Ha függetlenek, akkor a csillagok finomabb felületi képét tudjuk megfigyelni, mint amit vártunk.

A Delta Scuti csillagok földi megfigyeléséhez képest (10–90 frekvencia), most frekvenciák százait köthetjük a CoRoT által vizsgált Delta Scuti csillagokhoz (HD 174936 – 422, HD 50844 – ~1000). A HD 50844 csillag eredeti fényváltozásai ± 30 mmag tartományba esnek. 250 frekvencia levonása után a fényváltozás még mindig ± 4 mmag. Ezer frekvencia eltávolítása után is még ± 1 mmag reguláris változást mutat a maradék fénygörbe.

Noha a Delta Scuti modellek jóslták számos kis amplitúdójú gerjesztett módus jelenlétét, de nem reméltük a megfigyelhetőségüket. Nem a kis amplitúdó miatt, hanem a csillagfelszín túl sok, túl kicsi darabjának ellentétes mozgása következtében létrejövő kioltási effektus miatt.

A CoRoT első Delta Scuti eredményei azt sugallják, hogy a csillag sokkal kisebb felszíni effektusait is meg tudjuk figyelni, mint azt korábban gondoltuk. A végleges következtetést több Delta Scuti csillag CoRoT-adatainak analízise alapján lehet meghozni. Az egyes csillagokra kapott eredményeknek azt kell megerősíteni és egyértelművé tenni, hogy a nagyszámú megfigyelt frekvencia önálló, független rengésekhez kapcsolódik, vagy a független rengések kölcsönhatásaként létrejövő kapcsolódási frekvenciák emelik meg a megfigyelt frekvenciák számát. Csak a független rengések frekvenciái alkalmasak a csillagok belső szerkezetének meghatározására.

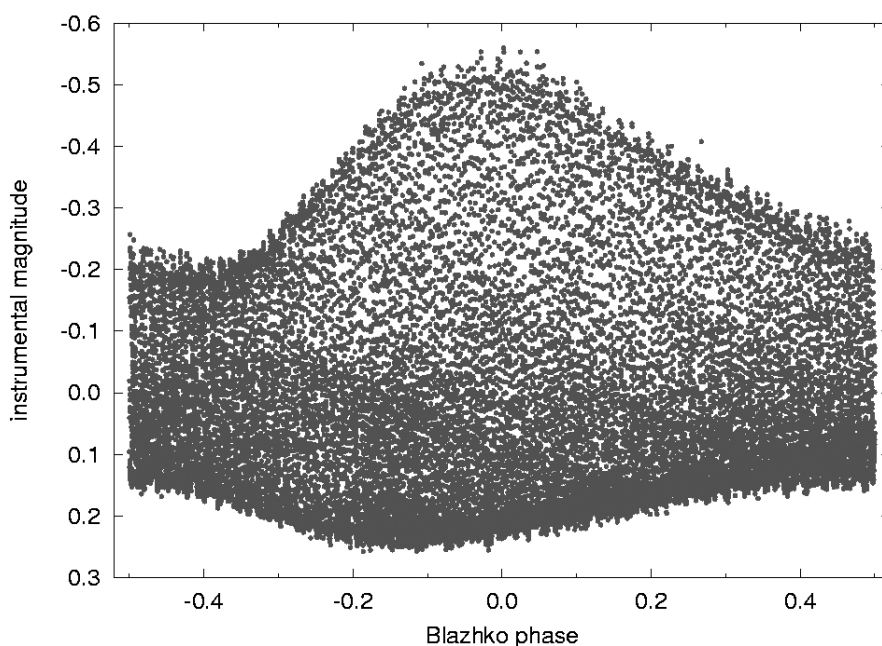
Hasonlóan nagyszámú rengés gerjesztését lehet azonosítani a Gamma Doradus csillagokban is. Az ugrás itt még nagyobb, a Földről meghatározható néhány frekvenciához képest közel ezer

frekvencia található a CoRoT-adatokban. Figyelembe véve, hogy nagyon sok Gamma Doradus csillagot mért a CoRoT-űrtávcső, csak idő kérdése, hogy az első eredmények letisztuljanak.

Noha a CoRoT-űrtávcső megfigyelt egy Delta Scuti csillagot, amelyet a magyar CoRoT csoport (HAG – Hungarian Asteroseismology Group, Magyar Asztroszeizmológiai Csoport, 5. ábra) fedezett fel az előkészítő munka során, a magyar csoport mégis az egyszerűbb pulzációt mutató RR Lyrae csillagok CoRoT-adatainak a feldolgozásával kezdte a tevékenységét (6. ábra). A döntés oka a földi és a CoRoT-adatok minőségének különbsége. Az űradatok specialitásait (l. Benkő József cikkét e kötetben) meg kell tanulni ahhoz, hogy érdemi következtetéseket lehessen levonni az adatok analízise során.

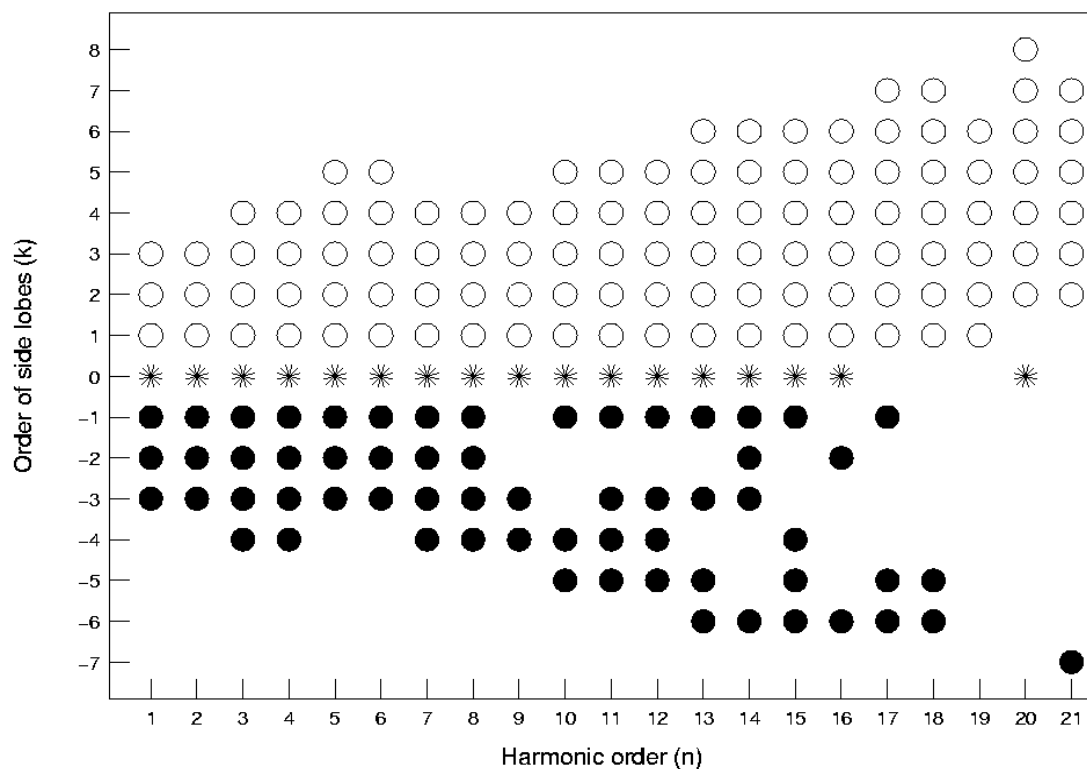


5. ábra. A magyar CoRoT csoport emblémája a pulzáló csillag körül röpködő boszorkány. A csoport angol nevének rövidítése (HAG) magyarul boszorkányt jelent.

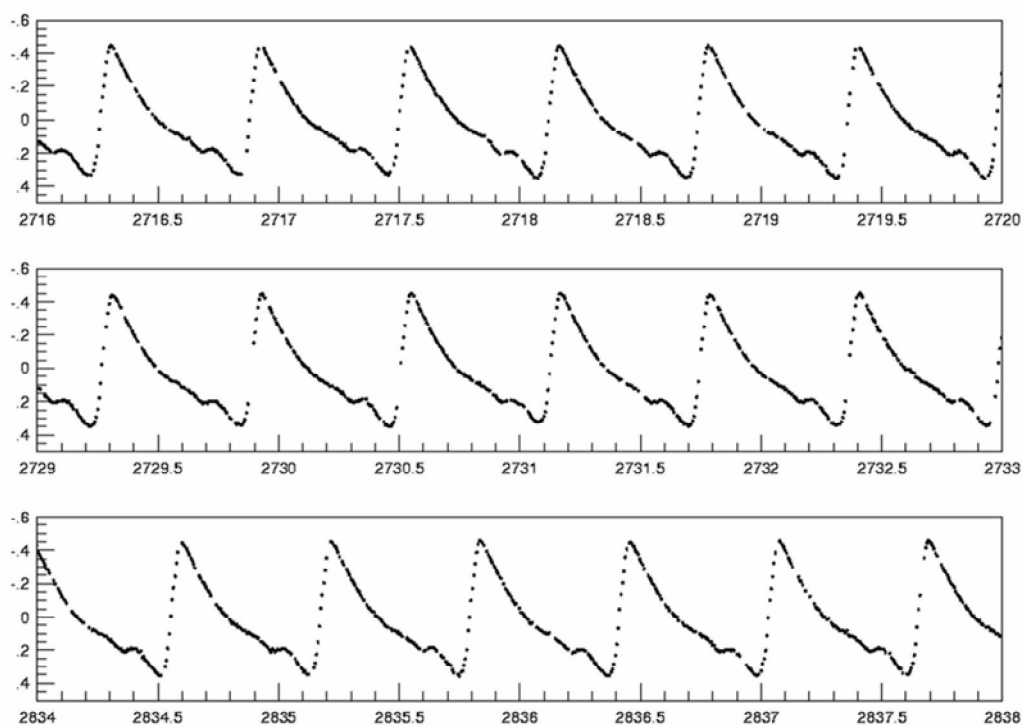


6. ábra. Domináns amplitúdó- és fázismodulációt mutató Blazhko-effektusos csillag Blazhko-periódus szerint összetekert fénygörbéje.

A CoRoT-adatok alapján az RR Lyrae csillagok többsége (egy nem nagy minta kb. 80 %-a) mutat Blazhko-effektust, azaz amplitúdó és/vagy fázismodulációt. Minden csillagra meghatároztuk a pillanatnyi periódust a Blazhko-ciklus alatt. Teljesen új koncepcióként, a telekommunikációban alkalmazott formalizmust használtuk a Blazhko-jelenség leírására, ami egy nagyságrenddel csökkenti az adatokból meghatározandó szabad paraméterek számát. Domináns amplitúdó- és fázismodulációt mutató RR Lyrae csillag viselkedését 5 Blazhko cikluson át vizsgáltuk.



7. ábra. Az amplitúdó- és fázismoduláció miatt jelentkező oldalcsúcsok eddig nem ismert komplex szerkezetét sikerült kimutatnunk a fő periódus és a felharmonikusok körül.

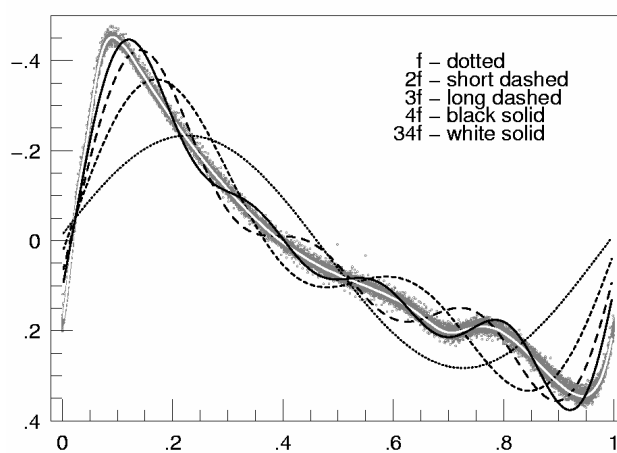


8. ábra. Egy monopériodikus RR Lyrae csillagot hasonló minőségben 150 napig folyamatosan mérte a CoRoT-űrtávcső. A fényváltozás legfeltűnőbb jellegzetessége a fényesség minimuma előtt jelentkező kifényesedés (bump).

A modulációk következtében megjelenő oldalcsúcsok nagyon komplex szerkezetét (triplet, kvintuplet, szeptupleten túl) határoztuk meg nemcsak a fő modulációs periódusra, hanem a felharmonikusokra is (7. ábra).

Monoperiodikus RR Lyrae csillag 150 napos folyamatos megfigyelésének egy szeletét mutatja a 8. ábra. A leszálló ágon megjelenő kifényesedés (bump) kapcsolatát vizsgáltuk a pulzáció felharmonikusával.

A feltehetően a csillag légkörében, a pulzáció nemlineáris természete miatt létrejövő lökéshullámhoz kapcsolódó kifényesedés időtartamát a pulzációs periódus hetedrészéhez (a hetedik felharmonikushoz) lehet kapcsolni. A pulzáció nagyfokú nemlinearitását mutatja, hogy a pulzációs periódus és még az első néhány felharmonikus illesztése sem adja vissza a megfigyelt fényváltozást. A fő periódus és 33 felharmonikusának az együttes hatása szükséges a fényváltozás tökéletes leírásához (9. ábra).



9. ábra. Monoperiodikus RR Lyrae csillag fénygörbéjének tökéletes illesztéséhez a pulzációs periódus mellett 33 felharmonikusát is figyelembe kell venni (fehér vonal). A fekete pontozott vonal a fő periódust, míg a különböző hosszúságú szaggatott vonalak az első három felharmonikus hatását mutatják. A negyedik harmonikus majdnem, míg a hetedik harmonikus pontosan leírja a kifényesedés időtartamát.

A CoRoT-űrtávcső megfigyelési pontossága a hagyományos vizsgálati módokon túl új lehetőségeket nyit. Új módszerekkel új területekre vezeti a kíváncsiságunkat. Az előzetes eredményeken túl számos új, időnként meglepetésekkel teli, nem várt eredményekre számíthatunk a következő években a CoRoT adataiból.

Irodalom:

- Benkő, J. M., Paparó, M., Szabó, R., et al., 2009, AIP Conf. Ser., 1170, 273
 García, R. A., Régulo, C., Samadi, R., et al., 2009, A&A, 506, 41
 García Hernandez, A., Moya, A., Michel, E., et al., 2009, A&A, 506, 79
 Gaulme, P., Appourchaux, T., & Boumier, P., 2009, A&A, 506, 7
 Paparó, M., Szabó, R., Benkő, J. M., et al., 2009, AIP Conf. Ser., 1170, 240
 Poretti, E., Michel, E., Garrido, R., et al., 2009, A&A, 506, 85
 Szabó, R., Paparó, M., Benkő, J. M., et al., 2009, AIP Conf. Ser., 1170, 291